

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОЧНЫМИ МАШИНАМИ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

Перегрузка ядерного топлива реактора ВВЭР-1000, осуществляемая перегрузочной машиной (МП) в течение примерно одного месяца во время ежегодных остановок реактора для планово - предупредительных работ, является одним из наиболее сложных и ответственных технологических процессов на АЭС. Ответственность перегрузки определяется требованием обеспечения ядерной безопасности и большими затратами при восстановительных работах в случае повреждений перегружаемых изделий (тепловыделяющих сборок (ТВС), кластеров СВП и ПЭЛ<sup>1</sup>) и элементов МП.

На реакторах ВВЭР-1000 перегружаемые изделия транспортируются МП под слоем воды толщиной около 4 м (т.н. "мокрый" способ перегрузки).

Зона обслуживания МП, изображенная на рис. 1, представляет собой пространство сложной конфигурации, состоящее из реакторного отсека (Р) 1; трех отсеков бассейнов выдержки (БВ1, БВ2, БВ3) 2-4 и отсека универсального гнезда (УГ) 5, включающего зону транспортного чехла 6 для свежих ТВС и гермопеналов (ГП)<sup>2</sup> и зону для размещения вспомогательных приспособлений 7. Переход МП из отсека в отсек осуществляется через транспортные коридоры 8.

МП состоит из трех основных элементов:

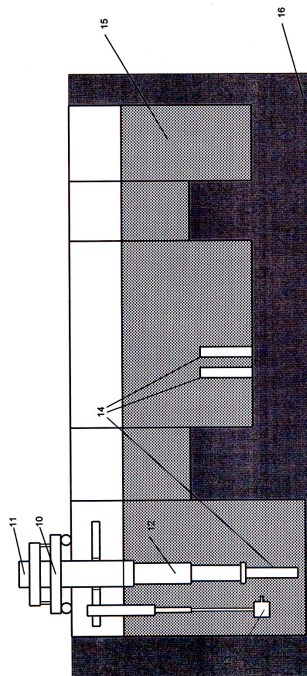
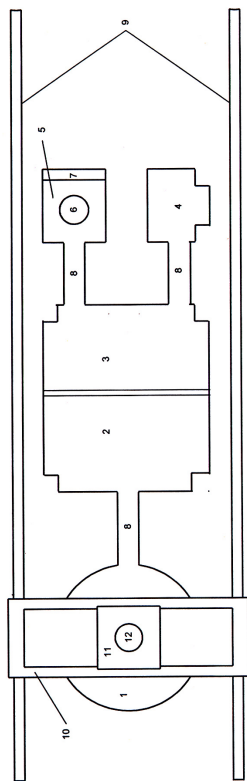
- перемещающегося над зоной обслуживания по рельсовому пути 9 моста 10 (координата X);
- перемещающейся по рельсам моста тележки 11 (координата Y);
- укрепленной на тележке телескопической трехсекционной рабочей штанги (РШ) 12 (координата Z).

РШ, в свою очередь, включает в себя механизмы перемещения захвата ТВС, перемещения захвата кластера, фиксатора захвата ТВС, служащего для его открытия и закрытия, а также механизма поворота РШ, служащего для открытия и закрытия пробок гермо-

<sup>1</sup> Кластеры СВП - пучки стержней выгорающего поглотителя; при перегрузке реактора устанавливаются в свежие ТВС и служат для компенсации избыточной реактивности ТВС. При следующей перегрузке переносятся в отработавшие ТВС для последующего удаления с территории АЭС.

Кластеры ПЭЛ - пучки поглощающих элементов; во время работы реактора сцепляются с приводом СУЗ. При перегрузке из отработавших ТВС переносятся в свежие.

<sup>2</sup> ГП служат для удаления дефектных или отработавших ТВС с территории АЭС.



**Рис. 1. Зона обслуживания МП:**

*1* - реакторный отсек; *2, 3, 4* - отсеки бассейнов выдержки отработавшего топлива БВ1, БВ2, БВ3; *5* - отсек универсального гнезда; *6* - зона транспортного чехла; *7* - зона вспомогательных приспособлений; *8* - транспортные коридоры; *9* - рельсовый путь; *10* - мост; *11* - тележка; *12* - рабочая штанга; *13* - телекамера; *14* - ТВС; *15* - слой воды; *16* - строительная часть реакторного зала

пеналов и пеналов системы обнаружения дефектных сборок (СОДС)<sup>1</sup>.

Процесс перегрузки контролируется специальной телевизионной системой (СТС), для чего МП снабжена механизмами перемещения телештанги и поворота площадки с телекамерой 13.

Особняком стоит механизм подрыва, предназначенный для проведения операции "подрыва" кассет при их затирании.

Технологию перегрузки можно описать как иерархическую структуру: "цикл - операция - элементарное движение", где технологический цикл состоит из нескольких технологических операций, включающих в себя ряд элементарных движений, каждое из которых представляет собой перемещение какого-либо одного механизма МП.

В табл. 1 кратко представлено описание технологии перегрузки топлива реакторов ВВЭР-1000, данное на основе вышеупомянутой иерархии применительно к обращению с ТВС, кластером и гермопеналом.

Зона обслуживания МП реакторной установки "большой" серии (аппарат типа В-320) имеет следующие основные параметры:

- максимальный ход моста, мм - 20630;
- максимальный ход тележки, мм - 7300;
- максимальный ход РШ (захват ТВС), мм – 9050.

Количество ячеек для установки ТВС в реакторе - 163; в БВ1 - 228; в БВ2 - 225; в БВ3 - 110. Количество ячеек для установки ГП в БВ1 - 21, в БВ2 - 28. Количество ячеек в БВ1 для пеналов СОДС - 4. Количество ячеек для пробок пеналов СОДС и ГП - 4. Количество ячеек в транспортном чехле для ТВС или ГП - 18. Количество гнезд для хранения вспомогательных приспособлений - 3.

Таким образом, общее количество координат наведения МП составляет более 800, что, наряду с необходимостью обеспечения высокой точности позиционирования ( $\pm 1$ мм), определяет высокие требования к контролю положения механизмов МП, который осуществляется специальными многоотсчетными датчиками угла поворота вала, жестко связанного с соответствующим механизмом.

Весьма высокие требования предъявляются и к контролю нагрузок механизмов захватов ТВС и кластера:

- диапазон нагрузок на тросе захвата ТВС от 0 до 2000 кг при точности измерения  $\pm 10$  кг;
- диапазон нагрузок на тросе захвата кластера от 0 до 21 кг при точности измерения  $\pm 1$ кг.

Для идентификации перегружаемых изделий различного веса

---

<sup>1</sup> В пеналах СОДС осуществляется контроль герметичности ТВС.

Таблица 1

Наименование технологического цикла	Наименование технологической операции	Маршрут перемещения МП	Используемые для элементарных движений составные части МП
1	2	3	4
<b>Обращение с ТВС</b>			
Загрузка свежей ТВС	Наведение на координату извлечения ТВС Контроль маркировки ТВС Извлечение ТВС Перемещение на координату установки ТВС Установка ТВС	УГ-БВ УГ-Р БВ-Р	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Перегрузка ТВС	Наведение на координату извлечения ТВС Контроль маркировки ТВС Извлечение ТВС Наведение на координату установки ТВС Установка ТВС	Р-Р	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Выгрузка отработавшей или дефектной ТВС	Наведение на координату извлечения ТВС Контроль маркировки ТВС Извлечение ТВС Наведение на координату установки ТВС Установка ТВС	Р-БВ Р-УГ БВ-УГ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Контроль герметичности ТВС, фаза "Установка ТВС"	Наведение на координату пенала СОДС Снятие пробки пенала СОДС Наведение на координату гнезда под пробку пенала СОДС Установка пробки пенала СОДС в гнездо Наведение на координату извлечения ТВС Контроль маркировки ТВС Извлечение ТВС Наведение на координату пенала СОДС Установка ТВС Наведение на координату пробки пенала СОДС (гнездо под пробку пенала СОДС) Извлечение пробки пенала СОДС Наведение на координату пенала СОДС Установка пробки пенала СОДС	Р-БВ БВ-БВ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Контроль герметичности ТВС, фаза "Извлечение ТВС"	Наведение на координату пенала СОДС Снятие пробки пенала СОДС Наведение на координату гнезда под пробку пенала СОДС Установка пробки пенала СОДС в гнездо Наведение на координату извлечения ТВС	БВ-БВ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)

1	2	3	4
	Контроль маркировки ТВС Извлечение ТВС Наведение на координату установки ТВС Установка ТВС Наведение на координату пробки пенала СОДС (гнездо под пробку пенала СОДС) Извлечение пробки пенала СОДС Наведение на координату пенала СОДС Установка пробки пенала СОДС		
Загрузка дефектной или отработавшей ТВС в ГП	Наведение на координату ГП Снятие пробки ГП Наведение на координату гнезда под пробку ГП Установка пробки ГП Наведение на координату извлечения ТВС Контроль маркировки ТВС Извлечение ТВС Наведение на координату ГП; Установка ТВС; Наведение на координату пробки ГП (гнезда под пробку ГП) Извлечение пробки ГП Наведение на координату ГП Установка пробки ГП	БВ-БВ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
<b>Обращение с кластером</b>			
Извлечение чехла кластера	Наведение на координату гнезда хранения чехла кластера Контроль гнезда Извлечение чехла кластера	БВ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Загрузка свежего кластера	Наведение на координату извлечения кластера Контроль маркировки кластера Установка чехла кластера Извлечение кластера Наведение на координату установки кластера Установка кластера	УГ-БВ УГ-Р БВ-Р	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Перегрузка кластера	Наведение на координату извлечения кластера Контроль маркировки кластера Установка чехла кластера Извлечение из чехла Наведение на координату установки кластера Установка кластера	Р-Р	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Выгрузка отработавшего кластера	Наведение на координату извлечения кластера Контроль маркировки кластера Установка чехла кластера	Р-БВ Р-УГ БВ-УГ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)

1	2	3	4
	Извлечение кластера Наведение на координату установки кластера Установка кластера		
Установка чехла кластера	Наведение на координату гнезда хранения чехла кластера Контроль гнезда Установка чехла кластера	БВ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
<b>Обращение с герметичным пеналом</b>			
Загрузка свежего ГП	Наведение на координату извлечения ГП Контроль маркировки ГП Извлечение ГП Наведение на координату установки ГП Установка ГП	УГ-БВ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)
Выгрузка ГП с дефектной или отработавшей ТВС	Перемещение на координату извлечения ГП Контроль маркировки ГП Извлечение ГП Перемещение на координату установки ГП Установка ГП	БВ-УГ	Мост, тележка, захват ТВС, фиксатор, телевизионная штанга (перемещение и поворот)

путем измерения нагрузок на тросах соответствующие механизмы МП снабжены тензодатчиками с усилителями.

Управление механизмами МП осуществляется с помощью системы управления перегрузочной машиной (СУМП), которая реализует изложенную выше технологию перегрузки. Функционально СУМП можно разделить на комплекс электрооборудования (КЭ СУМП), осуществляющий электропитание и электропривод механизмов МП, и управляющий вычислительный комплекс (УВК СУМП), осуществляющий сбор и обработку сигналов датчиков и пульта управления, выполнение технологических алгоритмов, выдачу задающих команд на электроприводы МП и представление информации оператору.

В связи с тем, что зона обслуживания МП весьма сложна как в плане (неправильная форма отсеков, узкие транспортные коридоры), так и по высоте (различные высотные отметки отсеков реактора, стеллажей бассейна выдержки и транспортных коридоров), положения и скорости всех механизмов МП должны быть строго определены и координированы между собой. Кроме того, главным конструктором реакторной установки задаётся диаграмма изменения скоростей перемещения захватов ТВС и кластера в зависимости от их координат. Исходя из указанных требований, шесть механизмов МП (мост, тележка, захват ТВС, захват кластера, поворот

РШ и подрыв) снабжены регулируемыми электроприводами. Электроприводы остальных трёх механизмов (фиксатор, перемещение и поворот телекамеры) нерегулируемые. Мощности регулируемых электроприводов от 0,55 до 1кВт, диапазон регулирования скорости 50; мощности нерегулируемых электроприводов 0,55 кВт.

Конструктивно СУМП представляет собой комплектные устройства низковольтной аппаратуры (шкафы управления) и пульт, с которого оператор осуществляет дистанционное управление процессом перегрузки. Шкафы и пульт управления расположены в т.н. "чистой зоне" с нормальными климатическими условиями.

Основные технические характеристики СУМП, которые эксплуатируются в настоящее время на российских АЭС, представлены в табл. 2.

Таблица 2

АЭС, номер энергоблока	Год ввода СУМП в эксплуатацию	Срок службы, лет	Основа электрорегулируемых приводов МП	Основа управляющего комплекса	Основа представления информации оператору	Основа контроля положения МП	Примечание
Нововоронежская. Блок 5	1980	10	Тиристорный привод постоянного тока ЭТЗР	Элементы "Логика-Т"	Электромеханическая мнемоника, стрелочные приборы	Командоаппараты, сельсины	
Калининская. Блок 1 Блок 2	1984 1986	10	Тиристорный привод постоянного тока ЭТЗР ЭТ6Р	Элементы "Логика-Т"	Электромеханическая мнемоника, стрелочные приборы	Командоаппараты, сельсины	
Балаковская. Блок1 Блок 2 Блок 3 Блок4	1985 1987 1988 1993	10	Тиристорный привод постоянного тока ЭТ6Р	Микро ЭВМ "Электроника - 60"	Графический монитор, стрелочные приборы	Сельсины	
Ростовская. Блок 1	2000	10	Тиристорный привод постоянного тока ЭТ6Р	Микро ЭВМ "Электроника - 60"	Графический монитор, стрелочные приборы	Сельсины	Поставка 1988 г.

Разработку и изготовление СУМП первого поколения для 5-го блока Нововоронежской, 1-го и 2-го блоков Калининской осуществил НПП ВНИИЭМ, разработку и изготовление СУМП второго поколения для энергоблоков "большой" серии (1 - 4-й блоки Балаковской, 1-й блок Ростовской) осуществило ПО "Средазэлектроаппарат" под научно-техническим руководством НПП ВНИИЭМ. Основные проблемные вопросы создания СУМП первого и второго поколения изложены в [1-3].

Характеризуя указанные СУМП, необходимо отметить следующее. Все СУМП имеют одноканальную структуру и не отвечают современным требованиям ядерной безопасности, в первую очередь в части соблюдения принципа единичного отказа. СУМП, электрооборудование и датчики МП не являются сейсмостойкими. Срок службы СУМП истёк практически на всех действующих энергоблоках, оборудование СУМП морально устарело, а электрооборудование МП, расположенное под оболочкой реактора, не соответствует требованиям окружающей среды (в первую очередь, двигатели постоянного тока).

В связи с этим актуальной является разработка СУМП и электрооборудования МП третьего поколения, предназначенных как для замены оборудования на действующих АЭС, так и для поставки на новые энергоблоки.

Структура СУМП нового поколения, блок-схема которой представлена на рис. 2, двухканальная, что обеспечивает соблюдение принципа единичного отказа: выход из строя какого-либо элемента СУМП не приводит к аварийной ситуации.

Структура УВК двухуровневая и двухканальная. На верхнем уровне - две рабочие станции на базе промышленных ПЭВМ, на нижнем - две микропроцессорные системы с интерфейсами датчиков. Верхний уровень обеспечивает супервизорное управление процессом перегрузки, связь с пультом оператора и отображение информации на мониторе. На нижнем уровне обеспечивается сбор и обработка сигналов датчиков положения и веса, реализация технологических алгоритмов, анализ защитных блокировок и выдача управляющих сигналов на электроприводы. Защитные блокировки работают по принципу "1 из 2", управление электроприводами - по принципу "2 из 2".

В КЭ предполагается реализовать систему двухканального электропитания, а в электроприводах механизмов МП использовать преобразователи частоты со специальными асинхронными короткозамкнутыми двигателями с встроенными тормозами. Преобразователи частоты групповые, по одному преобразователю на три регулируемых привода тех механизмов МП, которые по технологии работы не должны работать одновременно: один преобразователь УПЧ1 выборочно, по команде от УВК, с помощью устройств коммутации УК1 – УК3 подключается к двигателем моста, захвата ТВС, подрыва (Д1-Д3), а второй преобразователь УПЧ2, с помощью устройств УК4 – УК6 – к двигателям тележки, захвата кластера, поворота РШ (Д4-Д6). Аварийные конечные выключатели механизмов МП воздействуют на отключение электропитания соответствующего привода. Все основные датчики МП дублированы, в



качестве датчиков положения применяются энкодеры вместо сельсинов.

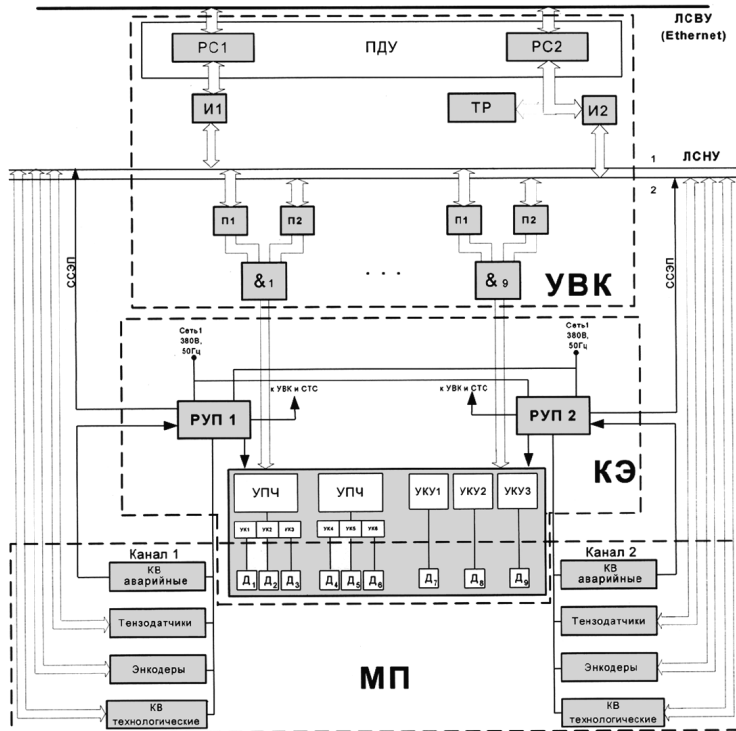


Рис. 2. Структурная схема СУМП:

PC - рабочая станция, П - процессор, ПДУ - пульт дистанционного управления, ЛСВУ - локальная сеть верхнего уровня, ЛСНУ - локальная сеть нижнего уровня, ИУ - исполнительное устройство, РУП - распределительное устройство питания, УПЧ - управляемый преобразователь частоты, УК - устройство коммутации, УКУ - устройство управления и коммутации, Д - двигатели, КВ - конечные и путевые выключатели; СТС - специальная телевизионная система; ССЭП - сигналы состояния электропитания

Повышение безопасности работы МП, кроме реализации двухканальной структуры СУМП, осуществляется также алгоритмически, путем автоматического снижения скорости (или останова) соответствующего механизма МП при потенциальной возможности столкновения с препятствием. При выполнении каждого техноло-

гического цикла (операции) реализуется оптимальная траектория движения механизмов с автоматической коррекцией скоростей по координатам в зависимости от абсолютного и взаимного положения механизмов МП. Оптимизация планирования траектории наведения на координату МП рассмотрена в [4].

СУМП нового поколения будет отвечать предъявляемым к ней современным требованиям (по ядерной безопасности, параметрам надёжности, сейсмостойкости, соответствию электрооборудования условиям среды под оболочкой реактора), обеспечит все основные режимы управления перегрузкой: автоматический, автоматический цикловой, автоматический пооперационный, ручной с технологическими блокировками, имитационный (тренажер для обучения оператора), а также протоколирование процесса перегрузки и действий оператора, контроль и диагностику основных параметров системы управления и отдельных элементов МП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Системы управления перегрузочных манипуляторов атомных электростанций с ВВЭР / Шиянов А.И., Герасимов М.И., Муравьев И.В. // М.: Энергоатомиздат. 1987.
2. Унифицированная система управления перегрузочными машинами атомных станций/ Жилкин Г.П., Красовский В.С., Поздняк А.Г., Портной Ю.Т., Герасимов М.И. // Труды ВНИИЭМ. М.: 1984. Т. 76.
3. Системы управления перегрузкой топлива реактора ВВЭР-1000 / Гизатуллин Ш.К., Жилкин Г.П., Портной Ю.Т. // Труды ВНИИЭМ. М.: 1990.Т. 94.
4. Гизатуллин Ш.К. /Оптимизация планирования траектории перегрузочной машины // Труды ВНИИЭМ. М.: 1990. Т. 94.